Über die specifische Doppelbrechung der Pflanzenfasern

von

Bog. Remec.

Aus dem pflanzenphysiologischen Institute der k. k. Universität in Wien.

(Mit 3 Textfiguren.)

(Vorgelegt in der Sitzung am 4. Juli 1901.)

Einleitung.

Zur Charakteristik der Pflanzenfasern wurden bis in die neuste Zeit zumeist anatomische und chemische Merkmale verwendet. Da aber in manchen Fällen die betreffenden Methoden nicht vollkommen ausreichen, so war es wünschenswert, festzustellen, inwieferne auch das Verhalten der Fasern im polarisierten Lichte praktisch verwertet werden könnte.

Die Resultate der diesbezüglich unternommenen Untersuchung fielen recht befriedigend aus und bieten dem Pflanzenanatomen in mancher Hinsicht auch ein theoretisches Interesse dar.

Schon Kindt[1] gibt an, dass man Schießbaumwolle von der rohen bei Anwendung des polarisierten Lichtes unter dem Mikroskope unterscheiden könne. Erstere leuchtet in Diagonalstellung bei gekreuzten Nicols nur wenig auf, während rohe Baumwollfäden Helligkeit mit den schönsten Farbenspielen erzeugen.

Schacht[2] und Wiesner[3] haben das allgemeine Auftreten solcher Polarisationsfarben an Pflanzenfasern, besonders an

---

[1] Poggendorff, Annal., 1847, S. 167 ff.

[2] Anatomie und Physiologie der Gewächse, I. Theil, 1856, S. 430 ff.

[3] Rohstoffe, I. Aufl., 1873, S. 291.

Bastzellen beobachtet. Auch G. Valentin[1] hat lebhafte Polarisationsfarben bei Baumwolle und Leinwandfäden beobachtet. Er erwähnt, dass ebenso schöne Farben, wie frisches Material, Fäden aus Leinwandstücken gegeben haben, in welche eine ägyptische Mumie eingewickelt war.

F. v. Höhnel[2] spricht den Gedanken aus, dass wahrscheinlich das Polarisationsmikroskop ganz brauchbare Kennzeichen zur Trennung und Unterscheidung der Pflanzenfasern bieten könnte. Doch hat er selbst keine diesbezüglichen Untersuchungen angestellt.

Drei Jahre später macht W. Lenz[3] Mittheilung von seiner Beobachtung, nach welcher das verschiedene Verhalten der Jute-, Leinen- und Hanffaser zum polarisierten Lichte leicht wahrnehmbare Unterschiede bietet. Er fand, dass im Schulzschen Gemische macerierte Flachs- und Hanffasern fast durchwegs bei gekreuzten Nicols ein überaus prächtiges Farbenspiel zeigen, während Jutefasern mehr einfärbig bläulich oder gelblich erscheinen. Dazu untersuchte er auch Fasern aus Herbarpflanzen von *Linum usitatissimum* L. und *Cannabis sativa* L., welche sich ebenso verhalten wie das rohe Material. Dieses Verhalten scheint ihm den betreffenden Fasern an sich eigenthümlich zu sein.

Eingehender hat sich mit dem Doppelbrechungsvermögen der Pflanzenfasern — mit der specifischen Doppelbrechung, wie er es nennt — Behrens[4] beschäftigt. Er meint, dass die mittels Färbung in Gruppen zerlegten Faserstoffe mit Hilfe von polarisiertem Lichte noch weiter getheilt werden können und gibt an, dass Parenchymzellen und Gefäße von Holz und Stroh, dann Zellen von Cocosfasern eine mehr oder weniger graue Polarisationsfarbe erzeugen, während Flachs, Hanf und Faserbündel von Jute alle Farben von Hellgrau hinauf bis Gelb II. Ordnung geben. Eine mittlere Stellung zwischen diesen beiden Extremen nehmen Baumwolle und Faserzellen von

[1] Untersuchungen der Pflanzen- und Thiergewebe im polarisierten Lichte, 1861, S. 235.

[2] Mikroskopie der technisch verwendeten Faserstoffe, 1887, S. 13.

[3] Zeitschrift für analyt. Chemie, 2. Heft, 1890, S. 133.

[4] Anleitung zur mikrochem. Analyse, 2. Heft, 1896, S. 3 und 27 ff.

Holz, Stroh, Phormium, Esparto und Jute ein. Die starke Doppelbrechung von Hanf und Flachs wird nach ihm durch häufiges Waschen und Bleichen und auch durch mechanische Beschädigung der Fasern nur wenig beeinträchtigt.

Von Herrn Hofrath Wiesner, der mich bei meinen Untersuchungen wohlwollendst unterstützte, wofür dem hochverehrten Lehrer mein tiefgefühlter Dank ausgesprochen sei, auf dieses Gebiet der wissenschaftlichen Forschung aufmerksam gemacht, prüfte ich anknüpfend an die von oben erwähnten Autoren schon beobachteten Thatsachen die wichtigeren, technisch verwendeten Faserarten[1] auf ihr Verhalten im polarisierten Lichte.

Es handelte sich zuerst darum festzustellen, ob alle die zu untersuchenden Fasern überhaupt doppellichtbrechend sind. Zu diesem Behufe wurden Faserbündel mit Wasser angefeuchtet und dann von ihnen einzelne Zellen auf mechanischem Wege mit Messer oder Nadel freigelegt.

Die so isolierten Zellen zeigen in das Orthoskop[2] gebracht bei gekreuzten Nicols durchwegs Aufhellung, welche jedoch in einigen Fällen (Fasern von *Cocos*, *Attalea*, *Borassus*-Frucht) äußerst schwach und kaum wahrnehmbar ist. Bastzellen anderer Pflanzen hingegen zeigen starke Aufhellung und dazu oft alle Interferenzfarben von Grau an bis Gelb zweiter Ordnung, der Reihe nach aufsteigend: Grau, Graublau, Weiß, Gelb, Orange, Roth, Indigo, Blau, Grün, Gelb. Während *Gossypium, Yucca, Senseviera*, *Aloë, Adansonia*, *Bromelia, Boehmeria* nur starke Aufhellung und außer Grau und Weiß keine Farben geben, kann man das Auftreten verschiedener Polarisationsfarben bei Fasern von *Corchorus, Agave, Musa*, *Linum*, *Cannabis*, *Thespesia*, *Urena*, *Hibiscus*, *Calotropis* u. a. beobachten. Doch kommen bei den letztgenannten Fasern neben zahlreichen Zellen mit hohen Polarisationsfarben auch solche vor, die schwach doppelbrechend sind, im polarisierten Lichte also grau oder weiß erscheinen. Eine Ausnahme bildet unter den von mir

[1] Das untersuchte Material stammt aus der Fasernsammlung des pflanzenphysiologischen Institutes der Wiener Universität.

[2] Tschermack, Lehrbuch der Mineralogie, 4. Aufl., 1894. S. 172.

untersuchten Faserarten die Bastfaser von *Calotropis gigantea*, deren niederste Polarisationsfarbe gelb ist. Oft ist es ziemlich schwierig, besonders wenn man sich mit solchen Farbenuntersuchungen nicht schon eingehender befasst hat, den Farbenton oder selbst die Farbenqualität anzugeben. Doch gibt es ein ausgezeichnetes Mittel, welches die Farbe genau zu bestimmen gestattet. Es sind dies die Additions- und Subtractionsfarben, welche im Orthoskope doppelbrechende Körper mit der rothen Interferenzfarbe des allgemein gebräuchlichen Gipsplättchens Roth I erzeugen. Eine bestimmte Grundfarbe wird nämlich nur bestimmte, entsprechende Additions- und Subtractionsfarben geben, so dass, wenn man auch die einzelnen Farben nicht wird unmittelbar ganz genau feststellen können, doch die aus der Subtractions- und Additionsfarbe und dem Roth I des Gipsplättchens resultierende Grundfarbe ermittelt werden kann.[1]

Alle Pflanzenfasern sind doppelbrechend.

Die Polarisationsfarben der Fasern.

Es war festzustellen, ob die Ursachen des verschiedenen Verhaltens der Faserarten im polarisierten Lichte typisch auftreten und die Fasern dadurch constant eine ganz bestimmte Erscheinung hervorrufen werden.

[1] Anmerkung:

Interferenzfarbe ohne Gipsplättchen	Mit Gipsplättchen, Additionsfarbe	Roth I combiniert, Subtractionsfarbe
Grau I	Indigo II	Orange I
Graublau I	Blau II	Gelb I
Weiß I	Grün II	Weiß I
Gelb I	Gelb II	Graublau I
Orange I	Orange II	Grau I
Roth I	Roth II	Schwarz I
Indigo II	Violett III	Grau I
Blau II	Blau III	Graublau I
Grün II	Grün III	Weiß I
Gelb II	Gelb III	Gelb I
Orange II	Rosa III	Orange I
Roth II	Roth III	Roth I

Die Ursache des specifischen Doppelbrechungsvermögens der Fasern liegt entweder in der chemischen oder in der physikalischen Beschaffenheit ihrer Zellwände. Trifft das letztere zu, so kann man wieder zwei Fälle unterscheiden: Die Polarisationsfarben können erzeugt werden durch den inneren Bau, durch die Structur der Zellmembran oder durch ihre äußere, zufällige Beschaffenheit, z. B. durch die Dicke. Doch schließt die eine Ursache die andere nicht aus: es können mehrere Factoren, die chemischen und die physikalischen, das ihrige zum Schlusseffecte beitragen.

Betrachten wir den ersten Fall, ob und inwieferne die Höhe der Polarisationsfarben von der chemischen Beschaffenheit der Zellhaut bestimmt wird.

Man kann in chemischer Beziehung hauptsächlich drei Arten von Fasern unterscheiden:

1. Solche, deren Membran aus nahezu reiner Cellulose besteht (*Linum*, *Calotropis*, *Boehmeria)*. Die Zellwand wird leicht in Kupferoxydammoniak gelöst. Chlorzinkjod gibt Violettfärbung.

2. Die Membran ist verholzt (*Musa*, *Corchorus*, *Cannabis* etc., die meisten untersuchten Fasern). Die Prüfung erfolgte mit den von Wiesner eingeführten Reactionen: mit Phloroglucin und Salzsäure und mit Anilinsulfat.

3. Ist sie verkorkt oder noch anderweitig chemisch stark metamorphosiert (*Attalea*, *Raphia*, *Bauhinia*, *Cocos*, *Borassus*-Frucht). Dass diese Fasern wirklich verkorkt sind, konnte man aus der Cerinsäurereaction ersehen, welche sie mit dem Schulze'schen Gemisch behandelt gegeben haben; es entstand nach dem Erkalten der Macerationsflüssigkeit ein flockiger Niederschlag welcher in heißem Alkohol und in Kalilauge löslich war.[1] Einen ähnlichen Niederschlag gab auch concentrierte Kalilauge, in welcher man die genannten Fasern gekocht hat, und die dann mit Salzsäure neutralisiert wurde. Die Zellmembran derselben Fasern färbte sich durch Chlorzinkjodlösung violett, wenn man vorher lange Zeit verdünnte Kalilauge

[1] E. Ebermayer, Chemie der Pflanzen, 1882, S. 193.

auf sie hat einwirken lassen. Da sich nach Ambronn[1] Cutin und Suberin im polarisierten Lichte ähnlich verhalten, könnte man zu dieser dritten Kategorie füglich auch diejenigen Fasern rechnen, welche mit einer Cuticula versehen sind und deren Membranen aus zwei sich chemisch verschieden verhaltenden Lamellen bestehen (Samenhaare).

Es müssen nun, wenn nur die chemische Beschaffenheit der Zellwand für die Höhe der Polarisationsfarben maßgebend wäre, sich chemisch gleich verhaltende Fasern unter sonst gleichen Umständen auch gleich hohe Interferenzfarben geben. Das ist aber thatsächlich nicht der Fall. Während nämlich die aus fast reiner Cellulose bestehenden *Boehmeria*-Fasern schwach doppelbrechend sind, sind die gleich dicken Cellulosefasern von *Linum* und *Calotropis* sehr stark anisotrop und zeigen hohe Polarisationsfarben. Chemisch identische Fasern verhalten sich selbst bei gleicher Dicke verschieden.

Ebenso konnte festgestellt werden, dass die Verholzung der Zellwand auf die Höhe der Farben keinen Einfluss hat, was schon Schacht[2] beobachtet hat. Wenn das Lignin die Farben beeinflussen würde, so könnte man an Fasern in verholztem Zustande höhere oder niedrigere Polarisationsfarben beobachten als an solchen, aus denen der Holzstoff entfernt worden ist. Es wurden deshalb die sehr stark anisotropen Hanffasern im Schulze'schen Gemisch entholzt. Verglich man nun im Orthoskop diese derart behandelten mit verholzten Fasern derselben Pflanze, so zeigten sie bei gleicher Dicke im Mittel auch die gleichen Polarisationsfarben: es gaben z. B. verholzte und entholzte Fasern mit 10 μ dicken Membranen die Farben Blau-Grün. Fasern von *Musa textilis* Née geben als höchste Farbe das Gelb I, welches sie auch dann zeigen, wenn aus ihnen das Lignin entfernt wurde, was nicht der Fall wäre, wenn der Holzstoff für die Höhe der Polarisationsfarben maßgebend wäre. Das Lignin spielt beim Doppelbrechungsvermögen der Fasern keine Rolle.

---

[1] Über das optische Verhalten der Cuticula und der verkorkten Membranen. Ber. d. Bot. Gesellsch., 1880, p. 26 ff.

[2] L. c. S. 432.

Aus dieser Thatsache zog ich sofort Nutzen. Es ist nämlich sehr schwierig, auf mechanischem Wege einzelne Zellen zu isolieren, ohne dass man sie beschädigt; ebenso schwer gelingt dies durch Maceration mit einem Gemisch von Chromsäure und Schwefelsäure,[1] denn beim längeren Einwirken derselben auf die Zelle wird diese nicht nur isoliert, sondern auch deren Membran angegriffen und zuletzt aufgelöst, weshalb man nie ganz sicher ist, dass man die Chromsäure nicht zulange hat einwirken lassen. Werden hingegen die Faserbündel in einem mit ziemlich viel Wasser verdünnten Schulze'schen Gemisch ($^1/_2$ *g* chlorsaures Kali, 5 cm^3 Salpetersäure und ebensoviel Wasser) vorsichtig 2 bis 3 Minuten gekocht, so werden die Faserzellen nicht nur entholzt, sondern auch isoliert, dabei aber bei gehöriger Vorsicht gar nicht angegriffen. Auf diese Weise bekommt man immer in kurzer Zeit eine größere Menge gut isolierter, ligninfreier Zellen, welche dann weiterhin auf ihr Verhalten zum polarisierten Lichte geprüft werden können. Die Membranen quellen auch nicht so viel auf, dass die Farbenerscheinung irgendwie modificiert werden würde. Die Fasern kann man entweder sogleich vor oder erst nach dem Austrocknen untersuchen. Nur erscheinen im letzteren Falle die früher matten Farben viel lebhafter und glänzender; es ist ein kleiner Tonunterschied in den Farben zu erkennen, die Qualität bleibt dieselbe.

Die in der dritten Gruppe angeführten Fasern waren verkorkt und dazu auch durchwegs verholzt, was man an dünnen Schnitten mittels Phloroglucin und Salzsäure leicht nachweisen konnte. Sie gaben im rohen Zustande, wie schon oben angedeutet wurde, als Polarisationsfarbe nur ein Grau I, welches so dunkel werden kann, dass die Fasern in der Flächenansicht gar nicht doppelbrechend erscheinen. Wurden sie im Schulzeschen Gemisch maceriert, welcher Behandlung sie viel länger als die übrigen unverkorkten Fasern Widerstand leisteten, so konnte man nachher mit Chlorzinkjod nachweisen, dass die Membran aus reiner Cellulose bestehe. In das Orthoskop gebracht, zeigten einzelne Fasern ein lebhaftes Aufleuchten, an

[1] Wiesner, Technische Mikroskopie, 1867, S. 38, Anmerkung.

Bauhinia-Zellen konnte man sogar Farben bis Grün II bemerken. Jedenfalls erscheinen jetzt die Fasern stärker doppelbrechend, was auf eine Einwirkung des Suberins auf die Höhe der Polarisationsfarbe hinweist, da ja das Lignin in dieser Hinsicht sich indifferent verhält. Das eingelagerte Suberin bewirkt eine — gewöhnlich nur geringe — Erniedrigung der von der Cellulosehaut gegebenen Polarisationsfarben. Dieses Verhalten entspricht vollkommen den Angaben H. Ambronn's,[1] der die erwähnte Erscheinung an verkorkten Membranen auf das optisch anomal reagierende Suberin zurückführt. Derselbe Autor hat auch beobachtet, dass sich im polarisierten Lichte ebenso wie das Suberin auch das Cutin verhält; die Cuticula bewirkt also an Baumwollfäden eine niedrigere Polarisationsfarbe, als sie die mit keiner Cuticulaschicht versehene Zellmembran geben würde. Doch ist die Differenz zwischen beiden Farben wegen der großen Feinheit des Cuticulahäutchens unbedeutend und kaum wahrnehmbar.

Weil nun die entholzten und ebenso die entkorkten Zellmembranen doch noch verschieden stark doppelbrechend sind, muss die Ursache der Anisotropie unbedingt in der physikalischen Beschaffenheit der Zellhaut gesucht werden.

Man kann sich die Zellmembran als eine Platte vorstellen.[2] Es hängt dann die Größe der Ablenkung des extraordinären Strahles auch von der Dicke des Plättchens ab, so zwar, dass,

[1] L. c. S. 26.

[2] Es ist bekannt, dass dünne, aus doppelbrechenden Krystallen geschnittene Platten im Orthoskop, welches die Beobachtung im parallel polarisierten Lichte gestattet, bei entsprechender Orientierung nebst Helligkeit oft auch lebhafte Farben erzeugen, die man als eine Interferenzerscheinung aufzufassen hat. Sie hängen ab vom Grade des Doppelbrechungsvermögens der Platte, ihrer Dicke und ihrer Lage zu den optischen Symmetrieaxen des Krystalles. Weil nun viele Minerale verschieden stark doppelbrechend sind, werden aus ihnen zur genaueren Bestimmung derselben gleichdicke Plättchen geschliffen, die je nach dem Doppelbrechungsvermögen hohe oder niedere Farben hervorrufen (G. Tschermack, diese Sitzungsberichte, Bd. 59, 1869). Der Gedanke, diese Bestimmungsmethode auch auf organische Objecte auszudehnen, war naheliegend, wurde schon wiederholt zum Ausgangspunkte der wissenschaftlichen Forschung gemacht und liegt auch der vorliegenden Untersuchung zugrunde.

je dicker die Platte, desto bedeutender die Entfernung zwischen beiden aus ihr austretenden Strahlen und dementsprechend die entstehende Interferenzfarbe höher sein wird und umgekehrt. Nehmen wir zwei Plättchen, die verschieden stark anisotrop sind. so wird der extraordinäre Strahl in dem einen, stärker doppelbrechenden mehr vom ordinären abgelenkt werden als dies beim zweiten, gleich dicken, aber schwach doppelbrechenden Plättchen geschehen würde; im ersten Falle wird deshalb eine höhere Interferenzfarbe resultieren als im zweiten. Die gleiche Interferenzfarbe werden solche zwei Plättchen dann erzeugen, wenn das schwächer doppelbrechende entsprechend dicker sein würde, denn da müsste der nur schwach gebrochene extraordinäre Strahl einen längeren Weg im Plättchen machen und wäre die Entfernung der beiden austretenden Strahlen voneinander gerade so groß, als ob die beiden Plättchen gleich stark anisotrop und gleich dick wären. Es wird auf diese Weise die Stärke der Anisotropie durch die Dicke der Platte paralysiert, und es kommt derselbe Schlusseffect zustande. Aus dieser theoretischen Betrachtung kann man ersehen, dass zwei Arten von Fasern dieselbe Polarisationsfarbe geben können, selbst wenn sie verschieden stark doppelbrechend sind.

Es wurden Fasern verschiedener Pflanzen bezüglich ihrer Dicke und dem entsprechenden Grade der Doppelbrechung mit einander verglichen. Es stellte sich heraus, dass allgemein dünnwandige Fasern nur niedere Polarisationsfarben geben, so zwar, dass Zellen, deren Membrandicke eine bestimmte Grenze nicht überschreiteit, nur niedere, Zellen aber mit dicken Wänden neben hohen auch niedere Polarisationsfarben erzeugen. Während z. B. *Gossypium*-, *Cocos*- und andere Fasern bei einer Zellwanddicke von 4 μ im polarisierten Lichte nur grau bis weiß erscheinen, geben Fasern von *Linum, Cannabis* u. a. m. neben niederen meist die höchsten Farben, besonders wenn sie eine beträchtliche Membrandicke aufzuweisen haben. Die Zellwand muss immer eine genügende Dicke erreichen, wenn hohe Polarisationsfarben zum Vorschein kommen sollen, auch dann, wenn die Faser an sich stark doppelbrechend ist, denn wie oben auseinandergesetzt wurde,

wird ja die Größe die Entfernung des austretenden extraordinären vom ordinären Strahle auch von der Dicke des Plättchens, hier speciell von der Membrandicke, bestimmt. Nur entsprechend dickwandige Fasern können die höchsten Farben hervorbringen.

Auch an Fasern einer und derselben Pflanzenart lässt sich ein gewisser Zusammenhang zwischen der Dicke der Zellmembran und der Höhe der Polarisationsfarben nachweisen, was man aus folgenden Daten ersehen kann:[1]

Calotropis gigantea Ait.

Zellbreite	Membrandicke	Polarisationsfarbe
16	4	Gelb I
22	3	Orange I
20	4	Indigo II
16	5	» »
16	5	Blau II
18	6	» »
18	6	Grün II
16	4	Gelb II
22	5	» »
18	7	» »
24	7	Orange II

Musa troglodytorum Née.

Zellbreite	Membrandicke	Polarisationsfarbe
10	2	Graublau I
10	3	» »
12	4	» »
10	3	Weiß I
16	5	Gelb I
16	6	» »
16	7	Orange I

Corchorus capsularis L.

Zellbreite	Membrandicke	Polarisationsfarbe
8	1	Grau I
10	2	» »
14	4	Graublau I

---

[1] Zellenbreite und Membrandicke sind in $\mu = 0 \cdot 001\, mm$ ausgedrückt; die römischen Ziffern neben den Farben bedeuten die Farbenordnung.

Zellbreite	Membrandicke	Polarisationsfarbe
8	3·5	Gelb I
22	5	» »
26	10	Roth I
18	7	Orange I

Agave sp.

Zellbreite	Membrandicke	Polarisationsfarbe
12	2	Grau I
14	3	Graublau I
20	4	» »
10	2	Weiß I
8	3	» »
16	4	» »
14	3	Gelb I
14	6	» »

Hibiscus sp.

Zellbreite	Membrandicke	Polarisationsfarbe
20	1	Grau I
12	2	» »
10	4	» »
10	3	Graublau I
10	4	Weiß I
14	2	» »
10	4·5	Gelb I
16	6	» »
16	7	» »
12	4	Orange I
10	4·5	» »
14	6	» »
12	5·5	Orangeroth I
10	3	Roth I
14	4	» »
12	5	» »
14	6·5	» »
16	7·5	» »

Urena sinuata L.

Zellbreite	Membrandicke	Polarisationsfarbe
9	4	Weiß I
8	3	Orange I
9	4	Roth I
10	4	Indigo II
14	6	» »

Cannabis sativa L.

Zellbreite	Membrandicke	Polarisationsfarbe
12	2	Grau I
8	2	Weiß I
26	4	» »
12	2	Gelb I
12	4	» »
28	8	» »
16	4	Orange I
14	5	» »
14	6	Roth I
14	5·5	» »
18	8	» »
18	6	Indigo II
24	7	» »
22	7	Blau II
14	5·5	Grün II
26	6	» »
24	8	» »

Abelmoschus tetraphyllus Wall.

Zellbreite	Membrandicke	Polarisationsfarbe
5	2	Weiß I
8	3	» »
12	4	Gelb I
9	4	Orange I
10	4	Roth I
15	6	» »
16	7	Indigo II

Aloë perfoliata.

Zellbreite	Membrandicke	Polarisationsfarbe
18	1	Dunkelgrau I
10	2	Grau I
14	2	» »
16	2	» »
20	4	» »
12	2	Graublau I
16	3	» »
10	2	Weiß I
18	4	» »

Thespesia Lampas Dalz.

Zellbreite	Membrandicke	Polarisationsfarbe
6	1	Graublau I
6	2	Grau I
6	3	» »
12	4	Weiß I
8	2	Gelb I
12	5	» »
12	5	Orange I
10	4·5	Roth I
11	5	» »

Linum usitatissimum L.

Zellbreite	Membrandicke	Polarisationsfarbe
12	4	Graublau I
10	3	Weiß I
12	4	» »
12	5	Gelb I
8	3·5	Orange I
14	4	» »
24	8	» »
13	6	Roth I
14	7	Indigo II
16	8	Blau II.

Es herrscht, wie aus dieser Tabelle zu ersehen ist und eine theoretische Erwägung es wahrscheinlich machte, zwischen der Membrandicke und der Höhe der Polarisationsfarbe ein Parallelelismus: je dicker die Zellwand, desto höher ist die Interferenzfarbe.

Man kann auch an einer einzelnen Faserzelle den Einfluss der Membrandicke auf die entstehende Polarisationsfarbe beobachten. Man sieht nämlich, dass jede Faser ihrer Breite nach verschiedene Farben zeigt, die gegen den Rand hin sich immer mehr dem Grau nähern. Die höchste Polarisationsfarbe erscheint nicht, wie man im ersten Augenblicke versucht wäre anzunehmen, in der Mitte der Faser, sondern zu beiden Seiten eines meist ziemlich breiten, gleichmäßig gefärbten Streifens, der die Mitte einnimmt. Diese Erscheinung wäre so zu erklären, dass man sich eine solche Faserzelle als eine Röhre mit dicken Wänden vorstellen

muss, welche zum Querschnitte einen Ring gibt. Nun hat ein Lichtstrahl, der von unten durch die Faser kommt, einen verschieden langen Weg zu machen, je nachdem er sie am Rande, in der Mitte oder irgendwo dazwischen trifft. Der längste Weg, den ein Lichtstrahl nimmt, wäre identisch mit der Sehne (ab in nebenstehender Figur), welche zugleich die Tangente an

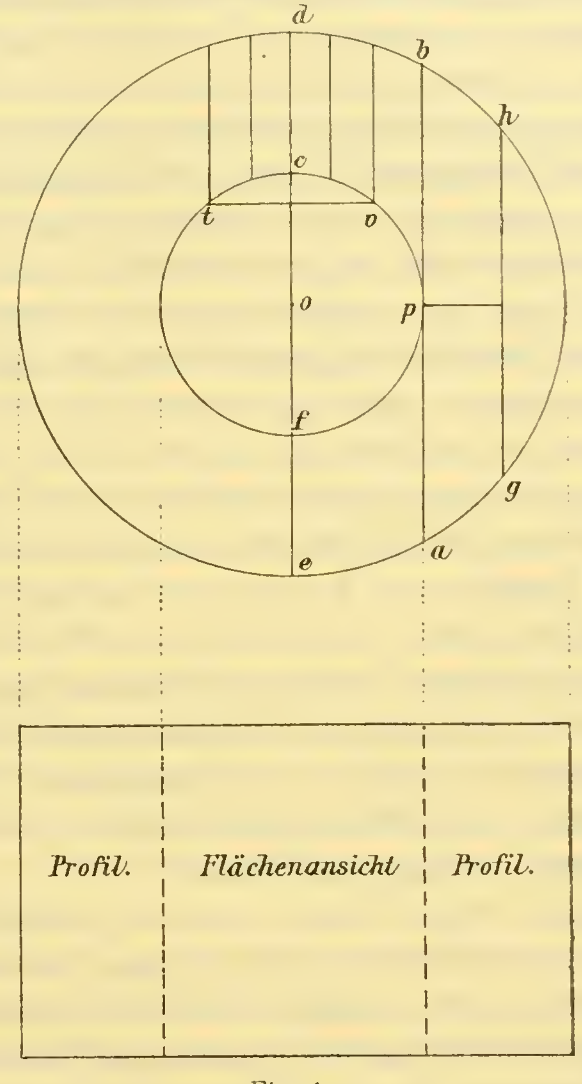


Fig. 1.

den inneren Kreis des Querschnittringes ist. Diesem Theile der Faser entspricht die höchste Polarisationsfarbe, alle übrigen Sehnen gegen außen hin sind kürzer, und die Polarisationsfarbe wird dementsprechend niedriger. Es hat auch eine bestimmte Sehne ($gh = dc + ef = 2dc$) die gleiche Länge mit dem Wege, den der Lichtstrahl durch die Zellwand nimmt, wenn er mit dem Durchmesser zusammenfällt. An diesen zwei Stellen müssen

also gleiche Farben zum Vorschein kommen, was auch der Fall ist. Die Wege, welche die Strahlen, in der Breite *tv* durch die Faserwand gehend, machen, sind fast gleich lang, es entsteht darum an dieser Stelle der schon oben erwähnte breite gleichfarbige Streifen. In der angeführten Tabelle und auch sonst ist bei Angabe der Polarisationsfarbe dieser Streifen gemeint.

Man könnte gegen diesen Beweis einwenden, dass in der Flächenansicht die longitudinal in der Faser verlaufende und die zur Faser tangentiale optische Elasticitätsaxe des Fresnelschen Ellipsoides zur Geltung kommen, während in der Profilansicht von der Tangente *ab* weiter die longitudinale und die radiale Axe maßgebend seien, dass man daher nicht ohneweiters die Seitentheile mit dem mittleren Bande vergleichen kann. Es ist wahr, dass obiger Beweis nur dann unbedingte Giltigkeit hätte, wenn die tangentiale und die radiale optische Axe gleich groß wären, dass aber sonst, wenn die radiale Axe kleiner ist als die tangentiale, wie dies von Schwendener[1] angegeben wird, dieses Axenverhältnis die Polarisationsfarbe beeinflussen wird. Da jedoch der Längenunterschied dieser Axen nur ein geringer ist, wovon man sich an Querschnitten leicht überzeugen kann, und dazu in der Flächenansicht die zur optischen Längsaxe senkrecht stehende immer aus einer Combination von Tangential- und Radialaxe bestehen wird, kann man wohl die besprochene Erhöhung der Polarisationsfarben am Rande der Zelle auf den größeren vom Lichtstrahle zu durchlaufenden Weg zurückführen.

Ein weiterer Beweis dafür, dass die Höhe der Polarisationsfarben von der Membrandicke abhängt, ist die Thatsache, dass Faserbündel oder parallel übereinander liegende Fasern hohe Polarisationsfarben geben, während die Fasern einzeln nur schwach doppelbrechend sind. Ebenso bewirkt »die Drehung einer flachen Baumwollfaser ein periodisches Ansteigen der Farben. An den Stellen, wo die schmale Seite der Faser nach oben gekehrt ist und so die Faserwand in der Durchfallsrichtung des Lichtstrahles sehr dick ist, ist eine hohe Polarisationsfarbe zu beobachten, welche immer mehr und mehr bis zu Grau

[1] Sitzb. Akad. Wiss. Berlin, 1887, S. 677.

herabsinkt, später aber bei einer neuen Drehung ebenso regelmäßig ansteigt.«[1] Es wäre daher verfehlt, wie dies Behrens gethan hat, »Faserbündel« einer Pflanzenart in Bezug auf Polarisationsfarben zu vergleichen; schon Lenz[2] betont, dass die Fasern gut isoliert sein müssen, wenn man die von ihm angegebenen Farben beobachten will. Ebenfalls unzulässig ist es, Fasern von bestimmter Breite miteinander zu vergleichen, denn nicht die Breite der Fasern, sondern ihre Membrandicke ist maßgebend.

Doch nicht nur in der Dicke der Zellhaut liegt die Ursache der Farbenverschiedenheit im polarisierten Lichte, sondern auch in ihrem organischen Aufbau und in ihrer Structur. Denn wäre die Dicke der Membran allein für die Höhe der Polarisationsfarbe entscheidend, so müsste mit der Dicke auch die Höhe der Polarisationsfarbe stetig zunehmen; es müsste z. B. eine Zelle mit 2 μ Membrandicke ein Grau I, eine solche von 3 μ ein Weiß I, eine dritte von 4 μ ein Gelb I u. s. w. regelmäßig mit zunehmender Membrandicke auch höhere Polarisationsfarben geben. Dies ist aber nicht der Fall. Oft zeigen nämlich gleich dicke Zellmembranen verschieden hohe Farben, und es kann auch geschehen, dass eine Faser mit beträchtlicher Zellhautdicke eine niedrigere Farbe erzeugt als eine zweite, die eine dünnere Membran besitzt. Man kann beobachten, dass z. B. eine *Cannabis*-Faser (wie in der Tabelle angegeben) von 8 μ Membrandicke ein Gelb I gibt, während eine nur 5·5 μ dicke Zellhaut eine viel höhere Polarisationsfarbe, das Grün II, zum Vorschein bringt.

Es gibt auch Fasern bestimmter Pflanzen, welche nur niedere Polarisationsfarben erzeugen, obwohl ihre Zellwand in der Dicke vollständig übereinstimmt mit der Zellhautdicke hohe Polarisationsfarben gebender Fasern von anderen Pflanzenarten. *Tillandsia*- und *Adansonia*-Fasern erreichen zuweilen eine Membrandicke bis 6 μ, geben aber im polarisierten Lichte durchwegs ein Grau, während z. B. *Cannabis*-Fasern von derselben Zellwanddicke die höchsten Farben erzeugen können.

---

[1] Nach Behrens, Mikrochem. Analyse.

[2] L. c. S. 134.

Aus den angeführten Thatsachen folgt, dass der Aufbau der Zellhaut auf den Grad der Doppelbrechung großen Einfluss ausübt, welcher Grad für die Fasern charakteristisch ist. Die Polarisationsfarben der verschiedenen Faserarten werden zwar nicht ganz constant sein, sondern sie werden immer zwischen bestimmten Grenzen schwanken, weil eben für dieselben zwei Factoren, die Dicke und die Structur der Membran, bei einigen Arten auch ihre chemische Beschaffenheit maßgebend sind. Doch werden diese Grenzen weder nach oben, noch nach unten hin überschritten, so dass Fasern der einen Art nur die niedersten Polarisationsfarben, die einer zweiten Art Polarisationsfarben bis Gelb I, die einer dritten Farben bis Indigo II u. s. w. geben werden.

Die Lage der Elasticitätsaxen in den Fasern.

Das oben erwähnte, zur genauen Bestimmung der Polarisationsfarben dienende Gipsplättchen bringt noch einen zweiten Vortheil mit sich: man kann auch die Richtung und den Verlauf der optischen Elasticitätsaxen des Fresnel'schen Ellipsoides in der Faser beobachten. Eine Additionsfarbe entsteht nämlich, wenn sich die beiden optischen Hauptaxen[1] des Gipsplättchens und der Faser decken; fällt aber die optische Hauptaxe der Faser mit der optischen Nebenaxe des Gipsplättchens — oder umgekehrt — zusammen, so entsteht eine Subtractionsfarbe. Kommt bei der Prüfung der Fasern eine Additionsfarbe zum Vorschein, dann weiß man, dass jetzt die optische Hauptaxe in der Faser parallel der des Gipsplättchens verläuft. Die Orientierung der optischen Elasticitätsaxen im Gipsplättchen ist bekannt, ergo kann auch die Richtung der optischen Elasticitätsaxen in der Faser angegeben werden.

Die eine optische Elasticitätsaxe in der Zellmembran verläuft, wie Zimmermann[2] dargelegt hat, in der Richtung

---

[1] Nachdem bei der mikroskopischen Beobachtung im Gipsplättchen und in der Fasermembran nur je zwei optische Axen des Elasticitätsellipsoides zur Geltung kommen, nenne ich die größere »Hauptaxe« und die kleinere »Nebenaxe«, ohne Rücksicht darauf, wie sich diese zum Ellipsoide verhalten.

[2] Molecularphysik. Untersuchungen. Ber. Deutsch. Bot. Gesellsch., Bd. II, 1884, S. 124.

der Poren, die andere senkrecht dazu, und zwar wie ich, dem genannten Autor folgend, der das Folgende als eine noch offene Frage bezeichnet, hinzufügen kann, bei Fasern in allen Fällen, wo die Membran nicht verkorkt ist, die Hauptaxe in der Richtung der Poren oder parallel zu den spiralförmigen Verdickungsschichten, wenn solche oder Poren vorkommen, und senkrecht dazu die Nebenaxe. Verkorkte Membranen zeigen ein anderes Verhalten, insoferne nämlich das eingelagerte Suberin das optische Axenverhältnis der Cellulosehaut beeinflusst. Das Suberin gehört zu den Stoffen, wie Traganth und Guttapercha, die gegen Zug und Druck anomal reagieren, d. h. doppelbrechend werden, wenn sie im festen Zustande gezogen werden, deren größere Elasticitätsaxe aber nicht, wie bei Glasfäden und den meisten amorphen Körpern, mit der Zugrichtung zusammenfällt, sondern senkrecht dazu zu stehen kommt. Ambronn[1] und vor ihm schon Zimmermann[2] haben beobachtet, dass das Suberin in den verkorkten Wänden von Birkenperiderm eine Umkehrung der Polarisationsaxen bewirkt, so dass die Hauptaxe senkrecht zur anatomischen Hauptaxe der Zelle orientiert wird. Ähnlich verhalten sich auch die verkorkten Membranen von *Cocos*-, *Tillandsia*-, *Atalea*-, *Raphia*-, *Bauhinia*-Fasern. Wird nämlich aus ihnen das Suberin entfernt, so verläuft dann die optische Hauptaxe parallel zu den Poren, die Nebenaxe senkrecht dazu; diese letztere wird aber in verkorkten Membranen mit der Längendifferenz der optischen Axe des eingelagerten Suberins verstärkt, wodurch die beiden ursprünglich verschieden langen Axen gleich lang werden können, und die Zellwand schwach doppelbrechend oder in einzelnen Fällen einfach lichtbrechend wird. Mitunter wird die kleine Elasticitätsaxe so verstärkt, dass sie zur großen wird und die ursprünglich große zur kleinen, so dass eine Umkehrung der Elasticitätsaxen eintritt (*Raphia vinifera* Beauv. im verkorkten Zustande). Auch in diesem Falle ist die verkorkte Membran schwach doppelbrechend, doch sind die Axen anomal gelagert: die optische Hauptaxe steht senkrecht zu den Poren.

[1] Über das optische Verhalten der Cuticula etc., S. 26.

[2] L. c. S. 42.

Die Poren, respective die Verdickungsschichten, nehmen zur Längenausdehnung der Faser eine ganz bestimmte Richtung ein; darum sind auch die optischen Elasticitätsaxen in der Membran in Bezug auf die anatomische Zellaxe bestimmt orientiert. Die optische Hauptaxe in der Membran verläuft entweder parallel zur Zellaxe *(Cannabis, Linum, Calotropis)* oder sie steht dazu mehr oder minder schief (*Senseviera*, *Stipa*, *Cocos*, *Tillandsia, Atalea* etc.). Der Winkel, welchen die optische Hauptaxe mit der anatomischen Zellaxe bildet, kann im Maximum 90° betragen (Treppengefäße). Betrachtet man nun eine ganze Faser, so bekommt man in der Fläche zwei übereinander liegende Membranen zu sehen, deren Poren entweder parallel oder, wenn sie in Spiralen angeordnet sind, windschief verlaufen. Im ersten Falle fällt die Hauptaxe aa' der Elasticitätsellipse in der oberen Membran mit der $\alpha\alpha'$ der unteren Zellwand zusammen; dasselbe geschieht mit den Nebenaxen bb' und $\beta\beta'$. Der Weg, den der Lichtstrahl durch die beiden gleichdicken Faserwände nehmen muss, ist noch einmal so groß als derjenige durch die untere oder obere Membran allein. Die Polarisationsfarbe wird erhöht.

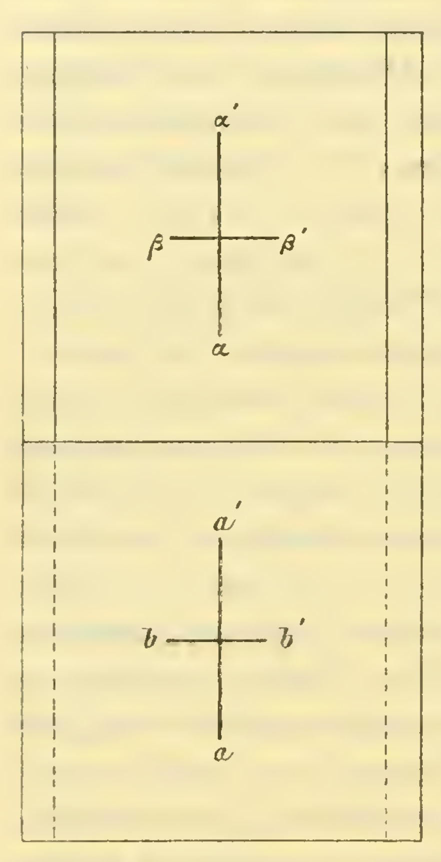


Fig. 2.

Sind die Poren nur wenig gegen die Zellaxe geneigt, so sind dementsprechend auch die optischen Axen nur wenig geneigt. Die Hauptaxe $\alpha\alpha'$ (Fig. 3) wird bei linksschief verlaufenden Poren in der oberen Zellwand, objectiv betrachtet, nach rechts, die aa' in der unteren nach links hinneigen. Die Nebenaxen neigen, weil sie senkrecht auf den Hauptaxen stehen, die obere $\beta\beta'$ nach links, die untere bb' nach rechts. Es entstehen aus jeder von diesen Axen je zwei Componenten, deren eine in der Richtung der Zellaxe, die zweite senkrecht

zu ihr verläuft. Auf diese Weise werden zwei neue Axen gebildet als Resultierende aller Componenten, welche in dieselbe Richtung fallen, eine (AA' und gg') parallel zur Zellaxe, die andere (BB' und hh') senkrecht dazu. Man bekommt, theoretisch genommen, zwei neue Elasticitätsellipsen $AA'BB'$ und $gg'hh'$. In $AA'BB'$ liegt die Hauptaxe parallel zur Zellaxe und der wirksame Längenunterschied der Elasticitätsaxen ist MM'. In $gg'hh'$ liegt die Hauptaxe senkrecht zur Zellaxe, die Längendifferenz der Axen ist NN'. Theoretisch kann man aus diesen Längendifferenzen der optischen Axen die definitive

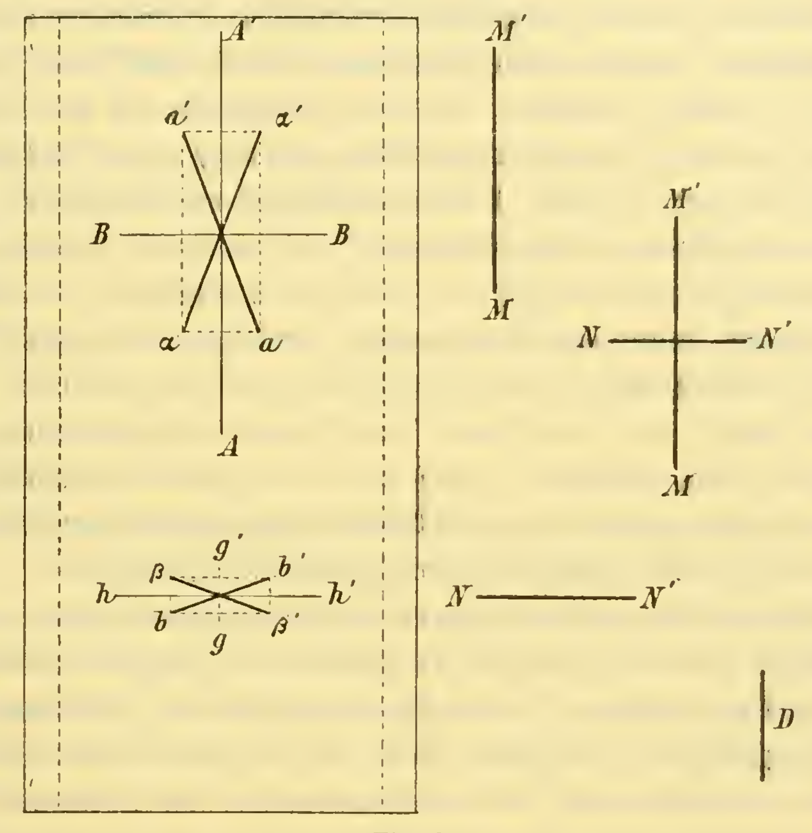


Fig. 3.

Elasticitätsellipse $MM'NN'$ der Faser construieren. Der für die Höhe der Polarisationsfarben maßgebende Längenunterschied D der Axen in dieser Ellipse und dadurch der Gangunterschied der Lichtwellen ist kleiner, als wenn die optischen Axen in der Membran parallel und senkrecht zur Zellaxe (Fig. 2) orientiert wären, so dass sich die von der Faser gegebene Elasticitätsellipse immer mehr dem Kreise nähert, je mehr die optischen Axen in der Membran geneigt sind, und zuletzt in denselben übergeht, wenn die optischen Axen in der Zellwand um 45°

gegen die Zellaxe geneigt sind. Die Faser erscheint dann in der Flächenansicht einfach lichtbrechend, weil die optische Hauptaxe der oberen Wand und die Nebenaxe der unteren Membran — und umgekehrt — zusammenfallen, wodurch jede der aufeinander senkrecht stehenden Hauptaxen mit der Nebenaxe verstärkt wird, so dass beide gleich lang werden und das durchgehende Lichtbündel nach allen Seiten hin gleiche Schwingungsweiten besitzt (oft bei Fasern von *Fourcroya gigantea* Vent.). Ist die optische Elasticitätshauptaxe in der Membran noch mehr als 45° zur Zellaxe geneigt, also mit dieser einen Winkel von 50° oder darüber bildend, so fällt die aus den Componenten resultierende Hauptaxe nicht mehr in die Richtung der Zellaxe, sondern sie wird senkrecht zu ihr stehen. Es tritt in der Faser eine Umkehrung der Polarisationsaxen ein. Diese Betrachtungsweise entspricht vollkommen den Erscheinungen, obwohl sich vielleicht theoretische Einwendungen machen ließen. Es geben nämlich die beiden übereinander liegenden Membranen der Faser mit schief zur Zellaxe verlaufenden Poren elliptisch polarisiertes Licht, welches durch den Analysator zur Interferenz gebracht wird, so dass Farben entstehen, oder es wird dasselbe ausgelöscht, wenn sich die beiden die elliptische Polarisation bewirkenden Objecte mit ihren optischen Axen unter 90° kreuzen.

Während die meisten Fasern Additionsfarben geben, wenn die Zellaxe und die optische Hauptaxe des Gipsplättchens sich decken, zeigen *Atalea*, *Cocos*, *Borassus*-Frucht, *Tillandsia* ein entgegengesetztes Verhalten. Sie geben, wenn das Suberin, welches störend wirkt, bei der Maceration im Schulze'schen Gemisch aus ihnen entfernt wurde, zur Grundfarbe ein Grau I, in Combination mit dem Gipsplättchen die Subtractionsfarbe Orange I, wenn die Zellaxe parallel zur Hauptaxe des Gipsplättchens zu stehen kommt und die Additionsfarbe Indigo II, sobald sich diese Axen in einem rechten Winkel kreuzen.

Schon Schwendener[1] hat auf zwei Arten von Pflanzenzellen hingewiesen: in die erste Kategorie, wo Additionsfarben

[1] Über Quellung und Doppelbrechung veget. Membranen. Ber. Akad. Wiss. Berlin, 1887, S. 671.

entstehen, wenn sich die Zellaxe und die optische Hauptaxe des Gipsplättchens decken, stellt er die statisch-mechanischen Bastzellen, in die zweite mit Fasern von anomaler Beschaffenheit in Bezug auf die optischen Elasticitätsaxen die specifisch dynamischen Zellen und die Netz- und Treppengefäße. Dynamische Zellen nennt Schwendener mit Steinbrinck und Eichholz »jene bastartigen Stereiden mit quergestellten Poren, welche durch ihre starke Contraction beim Austrocknen das Aufspringen der Frucht, die Krümmung der Fruchtklappen verursachen«.

Die specifische Polarisationsfarbe erreicht ihr Maximum, wenn die optischen Axen der Membran parallel und senkrecht zur Zellaxe stehen, werden immer niedriger, wenn die Axen geneigt sind, und werden zuletzt gleich Null, wenn die Axen eine 45°-Stellung einnehmen. Wie nun Faserarten die Poren in ihrer ganz bestimmten Orientierung beibehalten, so werden sie auch immer ein bestimmtes Doppelbrechungsvermögen zeigen, weshalb man von einer specifischen Doppelbrechung der Fasern sprechen kann.

Bisher wurden nur die in der Flächenansicht der Faser zur Geltung kommende longitudinale und tangentiale Axe des Fresnel'schen Elasticitätsellipsoids beachtet, doch kann man noch eine dritte optische Axe unterscheiden, welche radial liegt. Sie bildet mit der longitudinal in der Faser verlaufenden Axe eine zweite Elasticitätsellipse, welche dort in Wirksamkeit tritt, wo die Fasermembran im Orthoskop aufgerichtet erscheint. Diese Ellipse ist, weil die radiale Axe immer kleiner ist als die longitudinale, stets so orientiert, dass ihre Hauptaxe parallel zur Zellaxe steht, die Radialaxe aber senkrecht dazu. Bei der Prüfung über einem Gipsplättchen fällt die erstere immer mit der Hauptaxe des Gipsplättchens zusammen, wenn sich Radialaxe der Faser und Nebenaxe des Gipsplättchens decken, so dass Additionsfarben entstehen, wenn die Faser in der Richtung der optischen Hauptaxe des Gipsplättchens liegt und bei entgegengesetzter Stellung Subtractionsfarben, mag dann auch der mittlere Theil der Faser sich optisch anomal verhalten. Deshalb geben Zellen von *Cocos, Tillandsia, Atalea,* am

Rand, wo die Membran aufgerichtet erscheint (also im optischen Querschnitte), Additionsfarben, wenn der mittlere Streifen Subtractionsfarben gibt und umgekehrt.

Verwertbarkeit der specifischen Doppelbrechung bei der Bestimmung von Pflanzenfasern.

Man kann zwei Arten von Fasern unterscheiden: solche die Additionsfarben geben, wenn ihre Längsrichtung mit der Hauptaxe des Gipsplättchens zusammenfällt, und solche, welche in dieser Lage Subtractionsfarben geben. Die in die erste Abtheilung fallenden Fasern erzeugen verschieden hohe Polarisationsfarben, welche nicht nur durch die starke Dickenausbildung der Membran, sondern auch durch ihre Structur bewirkt werden. Hätten alle Fasern gleich dicke Membranen, so könnte man aus der Höhe der Polarisationsfarben den Unterschied im Doppelbrechungsvermögen der Fasern erkennen, sonst kann man aber nur angeben, welche Grenze die Polarisationsfarben einer bestimmten Faserart nicht überschreiten. Man wird daher aus der Polarisationsfarbe einer einzelnen Faser nicht ohneweiters auf ihre Herkunft schließen können, sondern man wird erst nach Untersuchung einer größeren Menge von Fasern derselben Art imstande sein, nur ihre Zugehörigkeit zu einer der unten angeführten Gruppen anzugeben.

Ich fasse in nachfolgender Zusammenstellung das praktische Ergebnis meiner Untersuchungen zusammen.

I. Die optische Hauptaxe fällt mit der Längsrichtung der Faser zusammen. Davon geben Polarisationsfarben:

a) Bis Weiß I, Fasern von:

Senseviera zeylanica Willd., *Aloë* sp. *Adansonia digitata* L., *Bromelia* sp. *Boehmeria nivea* Gaudich, *Fourcroya gigantea* Vent.

b) Bis Gelb I:

Musa textilis Née., *Agave* sp. *Cordia latifolia, Raphia vinifera* Beauv.

c) Bis Roth I oder Indigo II:

Corchorus capsularis L., *Stipa tenacissima* L., *Thespesia Sampas* Dalz., *Urena sinuata* L., *Hibiscus Cassei*, *Abelmochus tetraphyllus* Wall., *Triumfetta semitriloba* L.

d) Die höchsten Farben bis Grün II:

Pandanus odorat. L. fil., *Calotropis gigantea* Ait., *Crotolaria iuncea* L., *Bauhinia racemosa* Lam., *Linum usitatissimum* L., *Cannabis sativa* L.

II. Die Längsrichtung der Faser und die optische Hauptaxe stehen aufeinander senkrecht. Die Fasern sind meist dünnwandig und geben nur niedere Polarisationsfarben:

Cocos nucifera L., *Borassus flabelliformis* Murr., *illandsia usneoides* L., *Atalea funifera* Mart., *Foureroya gigantea* Vent.

Zusammenfassung.

1. Nach den bisher vom Verfasser angestellten Beobachtungen hat das Lignin keinen Einfluss auf die specifische Doppelbrechung der Pflanzenfasern. Hingegen setzen fettartige Einlagerungen in der Zellhaut den Grad der Doppelbrechung herab.

2. Selbst bei gleicher Dicke und gleicher chemischen Beschaffenheit der Zellmembran kann der Grad der Doppelbrechung verschieden sein, was auf Organisationseigenthümlichkeit beruht.

3. Wenn in der Zellhaut (spaltenförmige) Poren vorhanden sind, so fällt die größte optische Elasticitätsaxe des Fresnelschen Ellipsoids in der Membran in die Richtung der Poren.

4. Die übereinander liegenden Membranen der Fasern bewirken im allgemeinen elliptische Polarisation. Die Hauptaxe dieser von den Äthertheilchen beschriebenen Ellipse liegt bei einigen Fasern parallel, bei anderen senkrecht zur anatomischen Zellaxe.

5. Man kann in manchen Fällen bei gleicher chemischen Beschaffenheit und gleicher morphologischen Ausbildung der Zellmembran histologische Elemente voneinander im polarisierten Lichte unterscheiden.